

토모그램의 해상도와 영상처리 기법이 속도예측에 미치는 영향

이민희, 송다희, 김영석

Resolution and Image processing Methods of Tomogram and There impact of Computational Velocity Estimation

Minhui Lee, Dahee Song, Youngseuk Keehm

요약 : 암석의 속도를 정확히 예측하기 위해서는 속도에 1차적인 영향을 미치는 공극구조의 연구가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 고해상도 구조 해석에 가장 많이 사용하고 있는 X선 토모그래피 방법을 이용하여 공극구조를 획득하였다. 그러나 X선 토모그래피 방법의 경우 그 역산과정에서 발생하는 smoothing 효과에 의해 공극구조가 왜곡될 수 있다. 이를 간단한 공극구조 생성 방법인 single threshold 방법으로 이분화 할 경우 grain contact 부분이 명확히 표현되지 않아 입자의 접촉면적에 좌우되는 속도의 경우 많은 오차를 야기한다. 또한 grain contact의 정확한 기술을 위해서는 고해상도 토모그램 획득이 매우 중요하며, 해상도에 따른 속도의 변화양상 또한 정량적 분석이 필요한 부분이다. 이를 위해 본 연구에서는 영상처리 기법을 적용하여 다양한 이분화를 시도하고, 서로 다른 해상도의 토모그램을 이용하여 이들이 속도 계산에 미치는 영향을 분석하였다. 다양한 영상처리 기법을 적용한 결과 single threshold 방법으로 이분화 한 결과보다 정확한 접촉면적을 보여주는 이분화 결과를 얻을 수 있었지만 실제 계산된 속도에서는 그 향상 정도가 미미하였다. 고해상도 토모그램을 이용한 경우에는 입자의 grain contact이 명확하게 표현되었고, 속도 또한 상당히 향상된 결과를 보여주었다. 결론적으로 디지털 공극구조에서 시뮬레이션을 통한 속도 예측의 경우, 입자의 접촉 부분을 정확히 기술 할 수 있는 높은 해상도의 토모그램이 필수적이며, smoothing 효과의 제거 등의 영상처리와 병행된다면 보다 정확한 암석의 속도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : X선 토모그래피, 속도, 영상처리기법, 해상도

Abstract : Physical properties of rocks, such as velocity, are strongly dependant on detailed pore structures, and recently, pore micro-structures by X-ray tomography techniques have been used to simulate and understand the physical properties. However, the smoothing effect during the tomographic reconstruction procedure often causes an artifact - overestimating the contact areas between grains. The pore nodes near a grain contact are affected by neighboring grain nodes, and are classified into grain nodes. By this artifact, the pore structure has higher contact areas between grains and thus higher velocity estimation than the true one. To reduce this artifact, we tried two image processing techniques - sharpening filter and neural network classification. Both methods gave noticeable improvement on contact areas between grains visually; however, the estimated velocities showed only incremental improvement. We then tried to change the resolutions of tomogram and quantify its impact on velocity estimation. The estimated velocity from the tomogram with higher spatial resolution was improved significantly, and with around 2 micron spatial resolution, the calculated velocity was very close to the lab measurement. In conclusion, the resolution of pore micro-structure is the most important parameter for accurate estimation of velocity using pore-scale simulation techniques. Also the estimation can be incrementally improved if combined with image processing techniques during the pore-grain classification.

Keywords : X-ray microtomography, velocity, image processing, resolution

1. 서론

속도를 비롯한 투수율, 전기전도도 등과 같은 암석의 물성은 1차적으로 공극구조의 영향을 많이 받기 때문에 공극구조의 모양이나 형태에 대한 정확한 이해는 필수적이다(Dvorkin et al., 1999). 하지만 공극구조의 복잡성 및 모델링의 어려움

등의 이유로 암석의 공극구조를 고려한 연구에는 많은 제약이 있었다. 그러나 최근 컴퓨터 및 관련 기술의 발달로 고해상도 공극구조의 획득이 가능해지면서 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(Cundde et al., 2006). X선 토모그래피 방법(X-ray microtomography)은 고해상도 공극구조 해석에 가장 많이 사용되지만 역산 과정에서 발생하는 smoothing 효과에 의해 왜곡된 토모그램을 얻을 수 있는 가능성이 많다. 이러한 왜곡된 토모그램(microtomogram)을 단순한 single threshold 방법으로 이분화 할 경우 입자의 접촉부분이 과다하게 표현되고, 이렇게 얻어진 공극구조를 이용해 물성시뮬레이션을 통해 속도를 예측할 경우, 예측된 값 또한 실제보다 높게 예측되는 문제가 발생한다. 이러한 smoothing 효과가 속도예측에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 sharpening filter를 이용한 방법과 인공신경망을 이용한 방법으로 smoothing 효과를 제거하는 영상처리 기법과 해상도가 각각 약 $11\mu\text{m}$ 과 약 $2\mu\text{m}$ 인 토모그램에 적용해 보았다.

2. 암석의 3차원 구조 획득 및 이분화에 의한 문제점

공극구조를 고려한 암석의 속도 예측을 위해서 필요한 디지털 공극구조는 암석의 3차원 구조 해석에 가장 많이 사용되고, 비교적 높은 해상도를 가진 자료를 얻을 수 있는 X선 토모그래피 방법을 이용하였다. 이 방법은 비파괴 영상획득법의 일종으로 X선이 암석의 여러 방향을 통과하여 얻어지는 감쇠(attenuation)영상을 이용해 토모그램을 획득하는 것이다. 토모그래피 방법으로 얻어진 토모그램에서는 밀도가 높은 입자에서 공극에 비해 감쇠가 높게 일어나 밝은 색을 띠며, 상대적으로 낮은 감쇠를 보이는 공극은 어두운 색을 보인다(Fig. 1).

본 연구에 사용된 시료는 미국 네바다주의 Valley of Fire 주립공원에 산재하는 풍성기원의 사암으로 광물 입자의 크기 분포는 $0.1\sim 0.4\text{mm}$ 로 비교적 좋은 입도를 보이며, 공극률은 약 20~25% 정도이다(Mollema and Antonellini, 1996; Du Benard et al., 2002). 사암에서 공극률에 따른 실험식인 식(1)에서 예상한 결과, 공극률 23%를 갖는 사암에서 3.75km/s 의 속도를 보이는 것으로 알려져 있다(Han, 1986).

$$V_p = 4.9442 - 5.2011\Phi \quad (1)$$

영상처리기법의 적용 및 토모그램 해상도에 따른 속도 예측 결과를 비교하기 위해서 1024×1024 크기, 16bit gray-scale(65536등급), 약 $11\mu\text{m}$ 과 약 $2\mu\text{m}$ 의 해상도를 갖는 토모그램을 얻어 3차원 구조로 형성하였다.

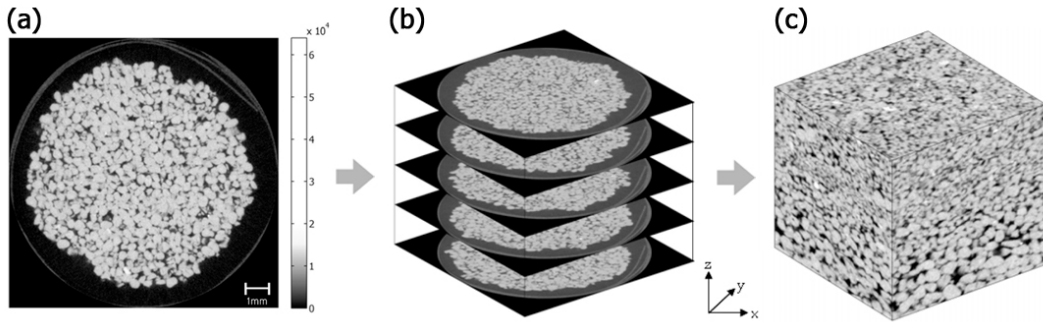


Fig. 1. Flowchart for constructing 3D tomogram. Light gray denotes grains and dark color is pore space. (a) 2D tomogram. (b) Stacking the 2D tomograms. (c) 3D tomogram volume after cropping boundary areas(이민희, 2007).

3차원 토모그램을 속도 수치시물레이션에 적용하기 위해서는 수치시물레이션에 적합한 형태인 공극과 입자로 구성된 자료로 변환하는 이분화(binartization) 과정이 필요하다. 이분화 중에서 가장 쉽고, 널리 사용되는 single threshold 방법은 경계 값(threshold)을 기준으로 그 이상은 입자로, 나머지는 공극으로 분류하는 방법이다. 하지만 이 방법을 토모그램에 바로 적용하게 되면 토모그래피 방법의 역산과정에서 발생하는 smoothing 효과로 인하여 입자와 입자사이의 공극 부분이 주변의 높은 값을 갖는 입자 픽셀의 영향으로 입자로 오분류되는 경우가 자주 발생하며, 입자간의 접촉부분이 실제보다 커져 공극모양도 보다 원형으로 나타나게 된다(Fig. 2).

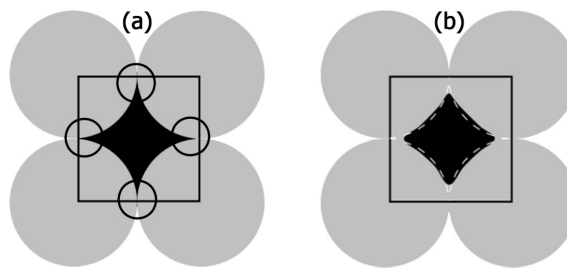


Fig. 2. Schematic diagrams representing the smoothing effect in the pore scale. (a) Original pore structure. (b) Distorted structure by the smoothing effect. Light gray denotes grains and black areas are pore space(이민희, 2007).

3. 영상처리기법의 적용

본 장에서는 smoothing 효과를 제거하기 위하여 sharpening filter를 이용한 방법 및 인공신경망 방법과 같은 영상처리기법을 적용하였다.

Sharpening filter는 영역기반 처리방법의 하나로 영상처리 분야에서 많이 사용되고 있는 unsharp mask를 변형한 방법이다(하영호 외, 2003). 이는 각각의 픽셀에서 주변 픽셀 값들의 평균을 제거하여 값이 변하는 부분을 보정하는 방법으로 식(2)와 같은 형태로 정의된다. 여기서 $g(x,y)$ 는 sharpening filter를 이용하여 보정된 이미지, $f(x,y)$ 는 원래 이미지 그리고 $f_u(x,y)$ 는 unsharp mask된 이미지를 나타낸다. Sharpening filter는 입자에서 공극으로, 혹은 공극에서 입자로 변하는 부분의 경계를 강조하는 기능을 갖는다. 결국 원래의 intensity값에 sharpening filter를 적용해 얻은 값을 보정해 smoothing 효과를 제거한 영상을 얻을 수 있고, single threshold 방법을 적용해 이분화 한다.

$$g(x,y) = f(x,y) + f_u(x,y) \approx f(x,y) + \nabla^2 f(x,y) \quad (2)$$

인공신경망을 이용한 영상처리 방법은 원격탐사, 패턴인식 등을 비롯한 다양한 분야에서 많은 활용이 되고 있다. 인공신경망은 학습데이터로부터 학습된 결과를 바탕으로 데이터를 분류해 내는 방법으로 정확한 학습데이터가 요구되며, 이를 바탕으로 주로 비선형적인 데이터의 분류에 많이 사용된다(Rumelhart, 1986; 김대수, 2005). 인공신경망 생성에 요구되는 입력패턴과 목표출력은 동일한 암중으로 제작된 박편 이미지를 분석하여 가상 자료를 생성하여 사용하였다. 가상 학습 자료는 박편의 해상도(약 $2.4\mu\text{m}$)를 토모그램의 해상도(약 $11\mu\text{m}$)와 일치시키고 토모그램의 intensity 분포 특성을 박편의 이진화 자료에 랜덤 함수를 이용하여 입자와 공극이 일정한 범위 분포를 갖도록 설정하고, 가우시안 함수를 이용하여 smoothing 효과와 비슷한 특징을 보이도록 설정하여 가상의 토모그램 데이터를 생성하였다. 분류 결과와 효율성 향상을 위해서 학습데이터의 입력변수를 정규화(normalization)하고 목표 출력을 벡터화 하는 방법과 학습과정에서 smoothing 효과를 고려하도록 설정하였다. 이러한 sharpening filter를 이용한 방법과 인공신경망 방법으로 분류된 결과가 Fig. 3에 잘 나타나있다. 기존의 single threshold 방법(b)과 비교해 보면 두 방법 모두 향상된 입자간 접촉면을 보여주며, 특히 인공신경망 방법(d)이 보다 향상된 결과를 보여주고 있다.

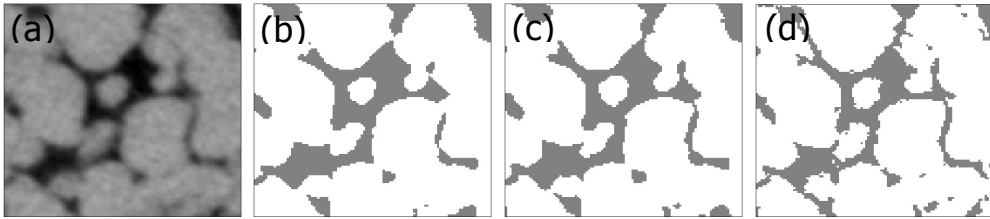


Fig. 3. Original tomogram (a) and three binary images by (a) single threshold method, (c) sharpening filter, and (d) neural network classification.

4. 속도 시뮬레이션

디지털 공극구조에서의 속도의 계산은 유한요소법을 이용한 변형률 에너지 최소화 방법을 사용하였으며, 이는 Roberts and Garboczi(2002)에 의해 제안된 방법을 수정하였다(Keehm, 2003). 탄성계수 측정을 위해서 입자는 석영으로, 공극은 염수로 설정하였다(Table 1).

Table 1. Material properties.

	Bulk Modulus	Shear modulus	Density	Remark
Grain	36.6 GPa	44.0 GPa	2.65 g/cm ³	Quartz
Pore	3.013 GPa	0 GPa	1.0 g/cm ³	Brine(50%)

앞서 제시한 sharpening filter를 이용한 방법과 인공신경망을 이용한 방법으로 생성된 3차원 공극구조를 이용하여 속도 시뮬레이션에 적용한 결과가 Table 2에 나타나 있다. 영상처리 기법의 적용 결과, 속도 예측에 가장 문제가 되는 grain contact 부분이 single threshold 방법으로 이분화 한 것에 비해 육안으로는 향상된 분류결과를 얻을 수 있었지만 계산된 속도 값은 그 향상 정도가 미미하였다.

Table 2. Calculated velocities from pore structures by three different binarization methods(이민희, 2007).

Model	V _p (km/s)	V _s (Km/s)	Spatial Resolution
Single threshold	4.69	3.00	11 μm
Sharpening filter	4.66	2.98	11 μm
Neural Network	4.55	2.89	11 μm

다음으로는 해상도가 서로 다른 토모그램을 이용하여 속도 예측을 실시해 보았다. 3차원 공극구조의 생성 방법은 single threshold 방법만을 적용하였다. 또한 해상도 변화에 따른 속도 변화를 좀 더 상세히 확인하기 위해 2.1 μm 의 해상도를 갖는 토모그램의 해상도를 1/2과 4/1로 감소하여 4.2 μm 와 6.3 μm 의 해상도를 갖는 3차원 공극구조를 생성하여 속도 예측에 적용하였다 그 결과 해상도가 높을수록 속도 예측 결과가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다(Table 3).

Table 3. Calculated velocities from pore structures with 4 different resolutions(송다희, 2009).

Spatial Resolution	11 μm	6.3 μm	4.2 μm	2.1 μm
Vp(km/s)	4.69	4.15	4.02	3.86

5. 결론

본 연구에서는 토모그래피 방법으로 얻어진 3차원 공극구조를 이용하여, 암석의 속도 예측시 발생하는 문제를 정량적으로 분석하였다. Smoothing 효과를 제거하기 위한 sharpening filtering 방법 및 인공신경망 방법 모두 육안으로 향상된 이분화 결과를 얻을 수 있었지만 계산된 속도의 향상 정도는 미미하였다. 반면 해상도가 다른 토모그램을 이용한 결과 고해상도 토모그램의 경우 grain contact 부분도 명확하게 표현되었으며, 계산된 속도도 실제 암석의 속도와 가까운 매우 높은 향상을 보여주었다. 이는 고해상도 토모그램을 이용하여 입자의 접촉 부분을 정확히 기술 하는 것이 영상처리 기법을 적용하는 것보다 더 중요하게 고려해야 할 요소라는 것을 시사한다. 따라서 시뮬레이션을 통한 속도 예측의 경우 고해상도의 토모그램이 필수적이며, smoothing 효과 제거를 위한 다양한 영상처리 기법과 병행된다면 보다 정확한 암석의 속도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

김대수, 2005, 신경망 이론과 응용 1, 진한엠엔비, 364pp.

이민희, 2007, X선 토모그램으로부터 3차원 공극구조의 생성기법과 암석물성 시뮬레이션에 미치는 영향, 석사학위논문, 공주대학교, 82pp.

- 송다희, 2009, 토모그램의 해상도와 평활화가 암석의 속도예측에 미치는 영향 분석, 석사학위논문, 공주대학교, 69pp.
- 하영호, 남재열, 이응주, 이철희, 2003, 디지털영상처리, 그린, 833pp.
- Cnudde V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Hoorebeke, L. V., Jacobs, P., 2006, Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool, *Applied Geochemistry*, 21, 826-832.
- Du Bernard, X., Eichhubl, P. and Aydin, A., 2002, Dilation bands: A new form of localized failure in granular media, *Geophy. Res. Lett.*, 29, 2176.
- Han, D, -H., 1986, Effects of Porosity and Clay Content on Acoustic Properties of Sandstones and Unconsolidated Sediments. Ph.D. Dissertation, Stanford University, Stanford, CA.
- Keehm, Y., 2003, Computational Rock Physics : Transport Properties in Porous Media and Applications, Ph.D. Dissertation, Stanford University, Stanford, CA.
- Mollema, P. N., and Antonellini, M. A., 1996, Compaction bands: a structural analog for anti-mod I cracks in eolian sandstone, *Tectonophysics*, 267, 209-228.
- Roberts, A. P. and Garboczi, E. J., 2002, Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids, *J. Mech. Phys. Solids*, 50(1), 33-55.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., 1986, Learning Internal Representation by Error Propagation : in *Parallel Distributed Processing*(Eds. David E. Rumelhart and James L.

사사 : 본 연구는 서울대학교 국가지정연구실 사업 지원(과제번호: ROA-2007-000-20120-1, 비정질을 3차원 네트워크내의 이동성질 규명)으로 수행되었습니다.